



*Получена математическая модель солнечного элемента, позволяющая учитывать зависимость его характеристик от уровня естественной освещенности. Построена компьютерная Matlab-модель системы электроснабжения локального объекта, включающая в себя солнечную электростанцию, повышающий широтно-импульсный преобразователь постоянного напряжения в постоянное и активную нагрузку.*



**УДК 621.313: 621.331**

**Н.А. Ильина**, д.т.н.,  
Харьковский национальный  
технический университет «ХПИ»  
**Д.В. Тугай**, к.т.н.,  
Харьковская национальная академия городского хозяйства  
**А.Н. Сабалаев**, аспирант  
Харьковская национальная академия городского хозяйства

## **ЧЕТЫРЕХТАКТНЫЙ ПОВЫШАЮЩИЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ В ПОСТОЯННОЕ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕЕЙ**

**Введение.** Неоспоримым недостатком традиционной энергетики, остается ее зависимость от использования углеродосодержащих энергоносителей в качестве топлива для электростанций. Истощение запасов угля, природного газа и нефти, усугубляется загрязнением окружающей среды, при их сжигании. В связи с этим в последние десятилетия появилось множество энергетических программ, направленных на развитие альтернативной энергетики.

Солнечная энергетика (или гелиоэнергетика) как экологически чистый вид энергетики стремительно завоевывает мировой энергетический рынок. Наряду с дискретными мало-мощными гелиоустановками (0.1–10 kW), предназначенными для питания локальных объектов, появляются солнечные электростанции мощностью более 1 MW, подсоединенные к промышленной сети электроснабжения [1].

Для согласования работы солнечной электростанции и промышленной сети необходимо специальное преобразовательное оборудование. В качестве такого оборудования чаще всего используется активный управляемый выпрямитель (АУВ), выходные характеристики которого соответствуют современным стандартам, регламентирующим качество электроэнергии [2, 3]. АУВ представляет собой трехфазный мост на силовых IGBT транзисторах с обратными диодами, на вход которого через повышающий широтно-импульсный преобразователь постоянного напряжения в постоянное (ППНП) подается напряжение солнечной батареи (рис.1). Параллельно выходу солнечной батареи подключается конденсатор незначительной емкости  $C1$ . Выходные зажимы АУВ подсоединяются к промышленной сети переменного тока. Во входную цепь выпрямителя включается конденсатор  $C2$ , напряжение на котором должно быть выше амплитуды линейного напряжения питающей сети:

$$U_c = k \cdot E_{am}, \quad (1)$$

где  $k = 1,25 \div 1,5$ .

Стабильная работа преобразователя соответствует условию  $C2 \gg C1$

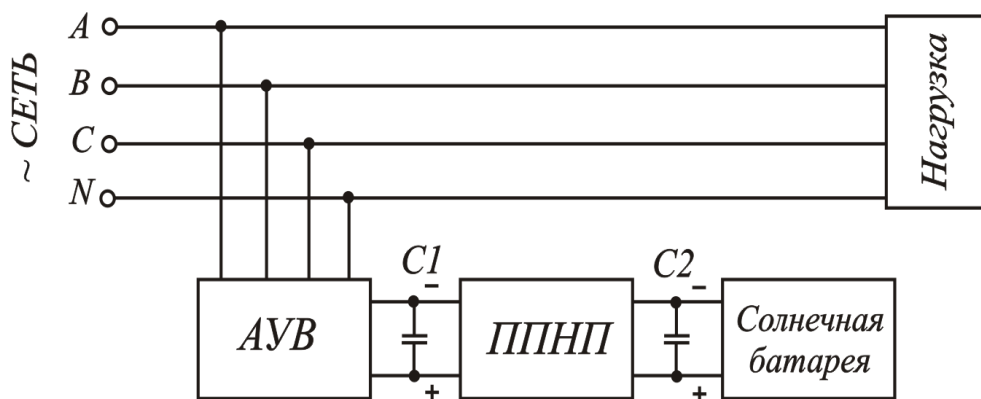


Рис.1. Блок-схема силовых цепей солнечной электростанции с преобразовательной системой на основе АУВ и ППНП

В связи с тем, что выходная мощность солнечной батареи зависит от уровня естественной освещенности и может изменяться в широких пределах, а выполнение соотношения (1) обязательно, в качестве согласующего звена между батареями и АУВ используется ППНП. Регулирование мощности, отдаваемой электростанцией в промышленную сеть, в преобразовательной системе по рис.1, может осуществляться двумя способами:

- с помощью системы регулирования ППНП;
- с помощью системы регулирования АУВ.

Оба способа позволяют реализовать режим работы, соответствующий отбору максимальной мощности от солнечной батареи.

В данной статье рассматриваются характеристики четырехтактного повышающего широтно-импульсного преобразователя постоянного напряжения в постоянное в системе автономного электроснабжения с солнечной электростанцией. Излагаются принципы построения системы регулирования ППНП, обеспечивающие наиболее эффективный режим работы электростанции. Приводятся результаты компьютерного Matlab-моделирования автономной системы электроснабжения локального объекта: солнечная батарея – повышающий преобразователь – потребитель.

Работа ППНП с солнечной батареей В солнечных электростанциях номинальной мощностью более 100 kW использование повышающего широтно-импульсного преобразователя постоянного напряжения в постоянное позволит снизить количество солнечных элементов, соединенных последовательно, и тем самым достигается эффект повышения общего к.п.д электростанции [4]. На рис.2 показана электрическая схема силовых цепей ППНП с солнечной батареей, подключенного на ее вход. Поддерживаемое постоянное напряжение на выходе повышающего преобразователя всегда больше напряжения на его входе. Это достигается за счет разделения во времени процесса накопления энергии в индуктивном элементе входной цепи и процесса передачи энергии в емкостной элемент выходной цепи.

Повышающий преобразователь выполнен четырехтактным. Четырехтактная структура представляет собой параллельное соединение четырех однотактных широтно-импульсных преобразователей, работающих со сдвигом во времени на  $T/4$ , где  $T$  – период ШИМ. Характеристики и режимы работы однотактного ППНП в системе распределенного электроснабжения подробно рассмотрены в [5]. В отличие от однотактного четырехтактный повышающий преобразователь обладает более гибкими энергетическими характеристиками. С помощью него можно поддерживать неизменным напряжение на выходном конденсаторе  $C2$ , изменяя величину тока нагрузки соответственно режиму отбора максимальной мощности. Кроме того, достигается уменьшение амплитуды высокочастотной составляющей выходного напряжения.

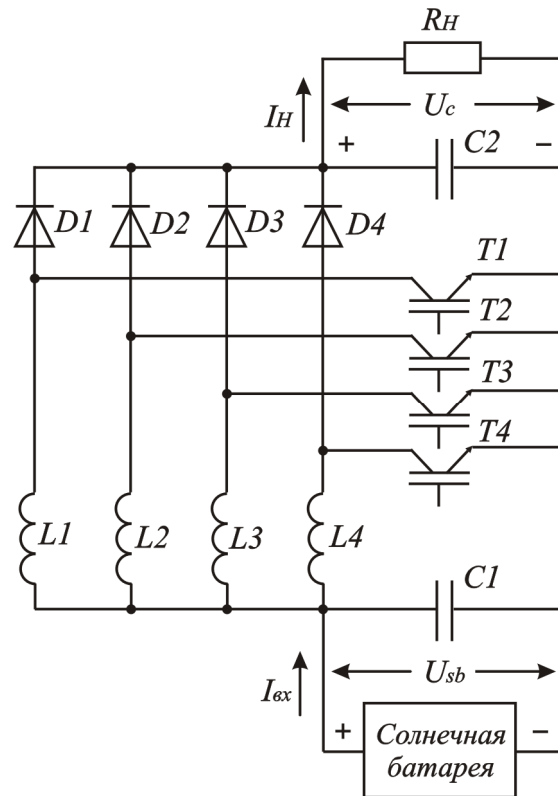


Рис.2. Электрическая схема силовых цепей ППНП с солнечной батареей

Математическая модель солнечного элемента. На рис.3 показана эквивалентная схема солнечного элемента (СЭ), работающего на активную нагрузку. Возможность отбора максимума мощности от солнечной батареи можно оценить, рассмотрев токи, возникающие в результате внутреннего фотоэффекта [6]. В результате облучения солнечного элемента излучением с длиной волны  $\lambda=0.2-2 \mu m$  через его р-п переход протекает ток (см. рис.3).

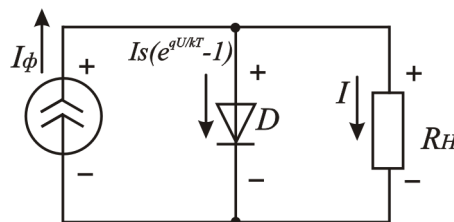


Рис.3. Эквивалентная схема солнечного элемента

$$I = I_s \left( e^{\frac{qU}{kT}} - 1 \right) - I_\phi, \quad (2)$$

где  $I_s$  – ток неосновных носителей (ток насыщения);  $I_s \exp(qU/(kT))$  – ток основных носителей;  $I_\phi$  – первичный фототок;  $q$  – заряд электрона по модулю;  $U$  – прямое смещение перехода;  $T$  – температура.

Соотношение (2) описывает вольт-амперную характеристику (ВАХ) идеального солнечного элемента.

На рис.4а представлена ВАХ солнечного модуля серии MCW на 120W и напряжение 12V (кривая  $I$ ) и зависимость рассеиваемой в нагрузке мощности от напряжения модуля для

уровня освещенности солнечного элемента  $E=1050 \text{ W/m}^2$  (кривая  $P/10$ ). Из рисунка видно, что максимальная отбираемая мощность солнечного элемента находится в режиме, соответствующем точке  $a$  ВАХ ( $I_p = 7.06 \text{ A}$ ;  $U_p = 17 \text{ V}$ ). Таким образом, при освещении  $p$ - $n$ -перехода контактная разность потенциалов в нем уменьшилась на величину  $U$ , а другие разности потенциалов не изменились. В результате на клеммах СЭ появилось напряжение  $U$ , называемое фотоЭДС, в сопротивлении  $R$  – ток  $I$ . Следовательно,  $p$ - $n$  -переход стал источником тока, в котором энергия света преобразуется непосредственно в электрическую энергию. Если алгоритм системы управления построен так, что рабочей точкой всегда остается точка  $a$  ВАХ, то выходное напряжение ППНП будет зависеть от двух параметров – первичного фототока и сопротивления нагрузки. Изменение величины фототока, в свою очередь, обратно пропорционально изменению освещенности солнечного элемента  $E$

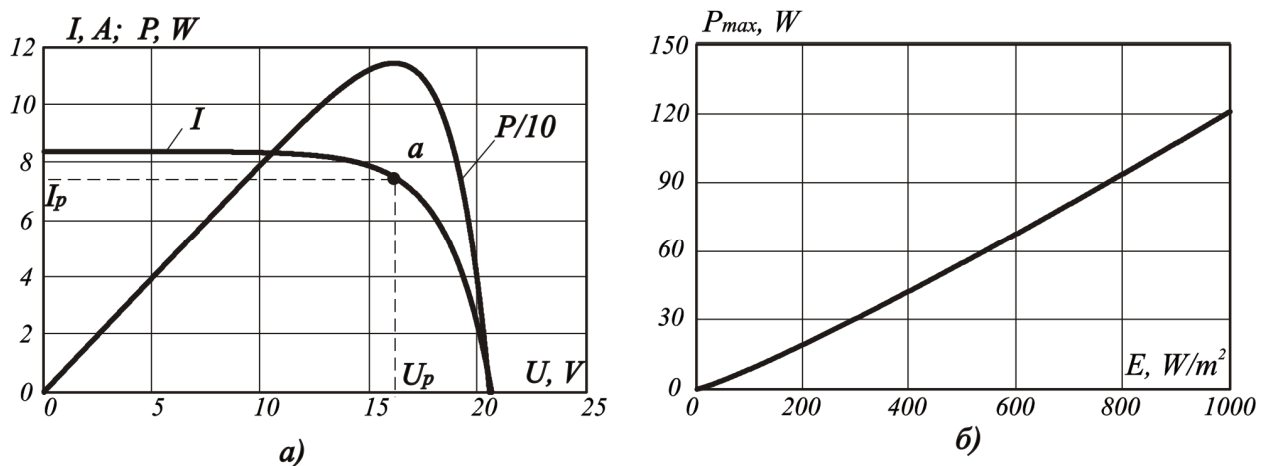


Рис.4. Характеристики солнечного модуля  
(а – ВАХ, б – зависимость мощности рассеиваемой в нагрузке от уровня освещенности)

$$I_{\phi} = \frac{E}{\alpha}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от типа солнечного элемента.

Согласно рис.4 а и соотношениям (2), (3), максимальную отбираемую мощность солнечного элемента можно найти, исследуя функцию  $P(U)$  на максимум

$$\frac{dP}{dU} = I_s \left( e^{\frac{qU_p}{kT}} \cdot \left( \frac{qU_p}{kT} + 1 \right) - 1 \right) - \frac{E}{\alpha} = 0, \quad (4)$$

где  $U_p$  – рабочее напряжение модуля, при котором его выходная мощность принимает максимально возможное значение.

Выразив  $U_p$  из соотношения (4) численно и подставив результат в (2), получим зависимость максимально отбираемой мощности солнечной батареи от уровня освещенности.

На рис.4б приведена зависимость максимальной отбираемой мощности от уровня освещенности солнечного модуля MCW12060-12. Как видно из рисунка, отбор максимума мощности от солнечного элемента соответствует режиму работы источника тока. При уменьшении уровня освещенности солнечной батареи ток и напряжение на ней снижаются. Если солнечная электростанция работает в режиме генерации максимальной мощности в

промышленную сеть, то, в качестве задания по току, рассчитывается ток, обеспечивающий положение рабочей точки на кривой максимальной мощности (см. рис.4б).

Надежность работы ППНП в преобразовательной системе с солнечной электростанцией будет зависеть от возможных пределов изменения тока на входе повышающего преобразователя. Входной ток преобразователя всегда должен быть больше тока нагрузки. Отношение входного тока к выходному ( $k_I$ ) должно находиться в пределах

$$1 \leq k_I \leq \frac{I_{cT}}{I_{ref}}, \quad (5)$$

где  $I_{cT}$  – коллекторный ток транзистора;

$$I_{ref} = \frac{U_c}{R_H} - \quad (6)$$

ток задания, определяющий постоянство выходного напряжения  $U_c$ ;  $R_H$  – сопротивление нагрузки, с учетом активных потерь в схеме.

Ток  $I_{cT}$  будет зависеть от количества параллельно включенных солнечных модулей ( $n_{nap}$ ), следовательно, соотношение (5) можно представить в виде:

$$1 \leq k_I \leq \frac{n_{nap} \cdot I_p \cdot R_H}{U_c}, \quad (7)$$

где  $I_p$  – рабочий ток модуля, при котором его выходная мощность принимает максимально возможное значение.

Отношение выходного напряжения ППНП к входному (коэффициент усиления напряжения  $k_U$ ) в соответствии с (5) находится в пределах

$$\frac{U_c}{U_p(I_{cT})} \leq k_U \leq \frac{U_c}{U_p(I_{ref})}, \quad (8)$$

где  $U_p(I_{cT})$ ,  $U_p(I_{ref})$  – напряжение солнечной батареи в режиме отбора максимальной мощности при входном токе, равном соответственно коллекторному току IGBT и току задания.

Напряжение  $U_p(I_{cT})$  будет зависеть от количества последовательно включенных солнечных модулей ( $n_{noc}$ )

$$\frac{U_c}{n_{noc} \cdot U_p} \leq k_U \leq \frac{U_c}{U_p\left(\frac{U_c}{R_H}\right)}, \quad (9)$$

Общее количество солнечных модулей электростанции

$$N = n_{nap} \cdot n_{noc}. \quad (10)$$

**Компьютерное моделирование ППНП в среде Matlab.** Проверку работы повышающего широтно-импульсного преобразователя постоянного напряжения в постоянное

осуществим с помощью Matlab-модели. На рис.5 представлена Matlab-модель солнечной электростанции с преобразовательной системой на основе четырехтактного ППНП, работающего на активную нагрузку.

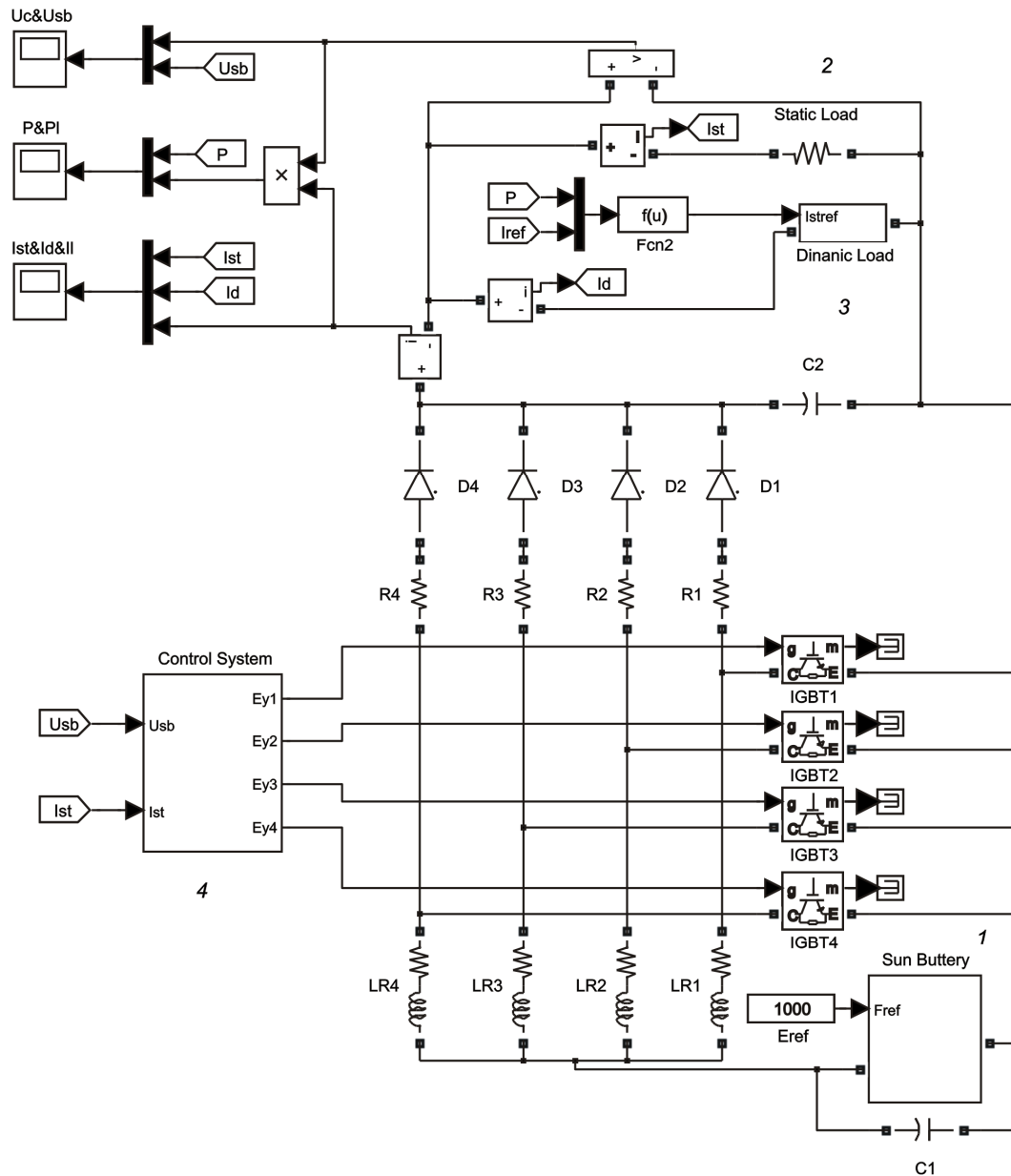


Рис.5. Matlab-модель солнечной электростанции с преобразовательной системой на основе четырехтактного ППНП

Во входную цепь преобразователя включена солнечная батарея (блок 1), укомплектованная 2260 модулями MCW12060-12. При максимальной мощности модуля 120W и габаритных размерах 1.411x0.691 м, максимальная мощность солнечной электростанции составит 271.2 kW при общей занимаемой площади 2204 м<sup>2</sup>. Блок 1 реализует солнечную батарею, ВАХ которой соответствуют соотношению (2). Во входной порт батареи в качестве задания подается сигнал уровня освещенности  $E_{ref}$ .

В качестве IGBT транзисторов выберем транзисторные модули фирмы ABB типа 5SNE 0800M170100, позволяющие шунтировать обратный диод дополнительным диодом, встроенным в модуль. Коллекторный ток такого модуля  $I_{CT}=800$  A, а коллекторно-эмиттерное напряжение  $U_{ces}=1700$  V. Используя 4 модуля 5SNE 0800M170100, получим батарею из 113 параллельно включенных рядов солнечных модулей по 20 последовательно соединенных

модулей в ряде. При 8 транзисторах, включенных по 2 в параллель, – 226 рядов по 10 модулей. Из неравенства (7), учитывая, что напряжение на выходном конденсаторе  $C2$  должно быть неизменным и равным 700 V, максимальный входной ток ППНП превышает выходной в 2 раза (113x20 модулей) и в 4 раза (226x10 модулей).

Солнечная электростанция работает в режиме отбора максимальной мощности от солнечных модулей, при этом нагрузка разделена на статическую, сопротивление которой не зависит от режима работы (блок 2) и динамическую, сопротивление которой зависит от изменения мощности электростанции (блоки 3). Максимальная мощность статической нагрузки определяется минимальной мощностью электростанции, соответствующей равенству тока задания  $I_{ref}$  входному току преобразователя  $I_{ex}$  (7), в связи с этим входной ток ППНП превышает статический ток нагрузки в 6 раз (при 4 IGBT) и 12 раз (при 8 IGBT). При максимальной мощности электростанции 271.2 kW максимальная мощность статической нагрузки составляет 93.7 kW.

Система управления (блок 4) повышающего широтно-импульсного преобразователя представляет собой подчиненный регулятор тока нагрузки, при котором от солнечной электростанции отбирается максимальная мощность, а напряжение на конденсаторе  $C2$  остается неизменным. На рис.6 показана блок-схема системы управления ППНП. В блоке сравнения 1 (БС1) сравниваются сигнал задания по напряжению на выходном конденсаторе  $C2$  и сигнал обратной связи по напряжению на солнечной батарее  $U_{sb}$ , после чего вычисляется параметр регулирования напряжения  $\gamma$ . В блоке сравнения 2 (БС2) сравниваются сигнал задания по току статической нагрузки  $I_{ref}$  с сигналом обратной связи по току статической нагрузки  $I_{st}$ . Результаты сравнения суммируются в БС3, и подаются в качестве входного задания в формирователь импульсов (ФИ) вместе с сигналом генератора пилообразного напряжения (ГПН). ГПН работает с постоянной частотой, меньшей, чем рабочая частота транзисторов.

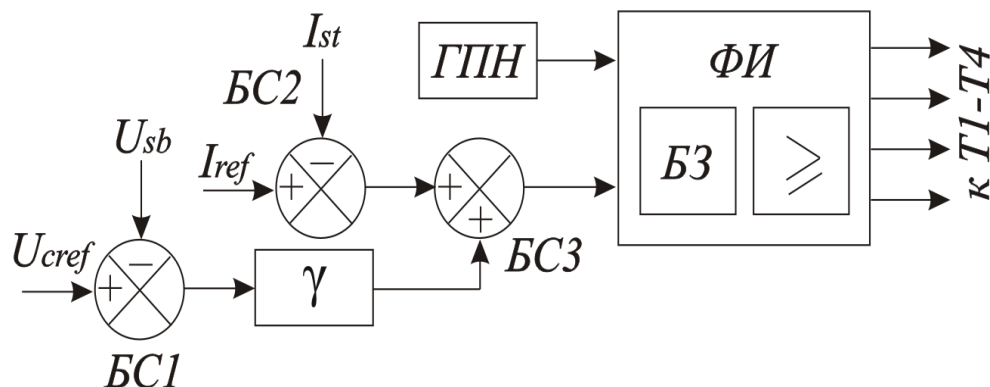


Рис.6. Блок-схема системы управления ППНП

На рис.7 представлены результаты моделирования на Matlab-модели системы электроснабжения локального объекта: солнечная электростанция – повышающий широтноимпульсный преобразователь постоянного напряжения в постоянное – нагрузка.

Первая и вторая осциллограммы (рис.7а и рис.7б) иллюстрируют суточное изменение освещенности на панели солнечного модуля, соответствующее ясному июньскому дню (рис.7а) и облачному июньскому дню (рис.7б) (кривые  $E$ ) [7]. На этих же осциллограммах приведена кривая изменения напряжения на выходе ППНП (кривая  $U_c$ ). Как видно из рис.7а,б выходное напряжение остается неизменным в течение времени работы электростанции:

$$T_p = T_{1вкл} - T_{2выкл}, \quad (11)$$

где  $T_{1\text{вкл}}$ ,  $T_{2\text{выкл}}$  – соответственно утреннее время включения электростанции и вечернее время выключение электростанции, обусловленные критическим уровнем освещенности, ниже которого электростанция выключена или находится в режиме ожидания.

На осциллограммах рис.7в и рис.7г показаны временные зависимости напряжения на входе и выходе повышающего преобразователя, соответствующие временному диапазону  $\Delta T_1$  рабочего режима (рис.7в) и временному диапазону перед выключением электростанции  $\Delta T_2$  (рис.7г). Из рис.7в видно, что выходное напряжение остается неизменным и поддерживается на уровне 700 V при скачкообразном изменении напряжения солнечной электростанции. При снижении освещенности солнечных модулей ниже  $E_{кр}$ , напряжение на выходном конденсаторе ППНП начинает снижаться (рис.7г), и поэтому электростанция должна быть отключена.

Осциллограмма рис.7д иллюстрирует временные зависимости токов нагрузки, соответствующие диапазону  $\Delta T_1$ . Как видно из рисунка, ток статической нагрузки остается неизменным в широких пределах изменения выходного тока повышающего преобразователя. Изменение тока динамической нагрузки прямопропорционально изменению мощности электростанции см. рис.7е. Следует отметить, что уменьшение тока нагрузки при неизменном уровне освещенности модулей, спровоцирует выход солнечной электростанции из режима отбора максимальной мощности. Увеличение сопротивления нагрузки вызовет смещение рабочей точки вправо по ВАХ (см. рис.4а). Для того, чтобы вернуться в режим отбора максимальной мощности, избыток вырабатываемой мощности целесообразно накапливать в аккумуляторе, подключенном к силовым зажимам электростанции.

За время работы в ясный июньский день  $T_r$ , (см. рис.7а), солнечная электростанция вырабо

$$\text{тает } W = \int_{T_{\text{вкл}}}^{T_{\text{выкл}}} p dt = 2,43 \text{ MWh электроэнергии.}$$

К.П.Д. преобразователя можно рассчитать из выражения

$$\eta = 1 - 3 \cdot \left( \frac{R_{\Sigma} I_{\text{вх}}}{U_{sb}} + \frac{\Delta U_T}{U_{sb}} \right), \quad (12)$$

где  $R_{\Sigma} = R_l + 2R_{on}$  – эквивалентное сопротивление, равное сумме активного сопротивления плеча преобразователя  $R_l$ , учитывающего активные потери в реакторе и источнике питания, и динамического сопротивления полупроводниковых приборов  $R_{on}$ ;  $I_{\text{вх}}$  – входной ток преобразователя;  $\Delta U_T$  – пороговое напряжение вентиля.

В таблице 1 приведено сопоставление результатов расчета по (2)-(4) с результатами, полученными на Matlab-модели системы электроснабжения при изменении освещенности солнечного модуля от 1000 до 387  $\text{W/m}^2$ . Расчет и эксперимент проводились для указанных выше характеристик преобразователя.

Таблица 1

$E$ , $\text{W/m}^2$	1000		900		800		700		600		500		400		390	
	Расч.	Экс.	Расч.	Экс.	Расч.	Экс.	Расч.	Экс.	Расч.	Экс.	Расч.	Экс.	Расч.	Экс.	Расч.	Экс.
$I_{\text{вх}}$ , A	844.7	845.1	759.2	759.5	673.9	674.2	588.6	588.9	503.5	503.7	418.5	418.7	333.7	333.9	322.7	133
$I_H$ , A	356.8	357	319.1	319.1	281.2	281.3	243.4	243.5	205.8	206	168.5	168.6	131.6	133.1	128.1	133
$P_H$ , kW	249.8	250.1	223.3	223.5	196.9	197	170.4	170.6	144.1	144.3	118	181.1	92.14	93.2	89.6	93.1
$\eta$	0.914	0.915	0.92	0.92	0.926	0.927	0.932	0.933	0.938	0.939	0.944	0.945	0.95	0.96	0.951	0.988

Из таблицы видно, что результаты, полученные из расчетных формул, совпадают с результатами эксперимента на модели. Причем эксперимент подтвердил, что в указанном диа-



пазоне изменения освещенности, выходное напряжение поддерживается постоянным.

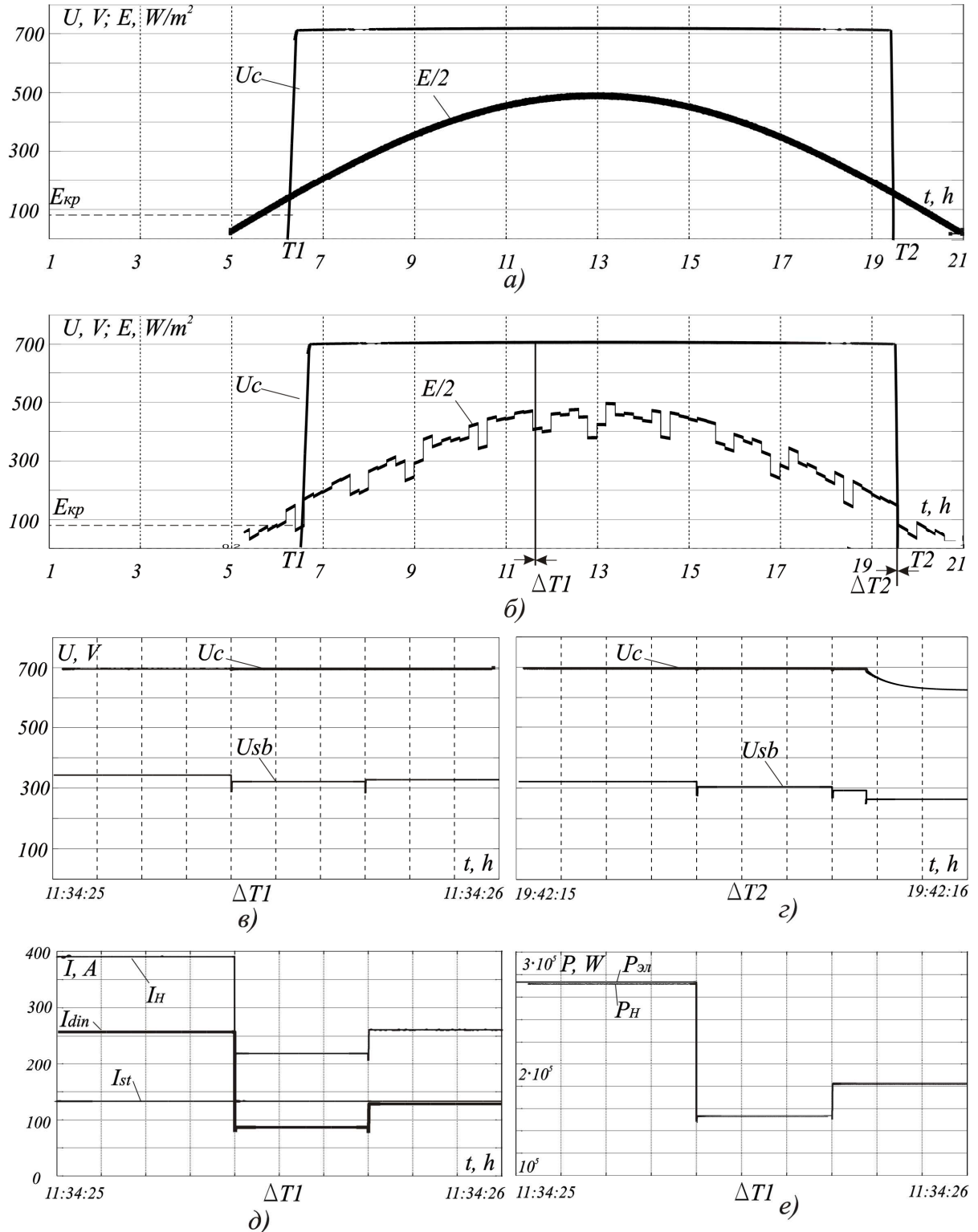


Рис.7. Осциллограммы, полученные на Matlab-модели системы электроснабжения с солнечной батареей и ПИД

### Выводы

1. Получена математическая модель солнечного элемента, позволяющая учитывать зависимость его характеристик от уровня естественной освещенности. Из аналитических соотношений видно, что наибольшая эффективность математической модели возникает при

фиксированном положении рабочей точки на ВАХ, что соответствует отбору максимума мощности от солнечного элемента.

2. Определены возможные пределы изменения тока и напряжения повышающего преобразователя при работе в режиме отбора максимальной мощности от солнечной электростанции. Отмечено, что при увеличении параллельно включенных солнечных модулей достигается увеличение пределов регулирования выходного тока ППНП, что позволяет электростанции работать при более низких уровнях освещенности.

3. Построена компьютерная Matlab-модель системы электроснабжения локального объекта, включающая в себя солнечную электростанцию, повышающий широтно-импульсный преобразователь постоянного напряжения в постоянное и активную нагрузку. Модель солнечной электростанции выполнена по модульному принципу с учетом математической модели солнечного элемента.

4. Экспериментальная проверка расчетных соотношений на Matlab-модели солнечной электростанции на максимальную мощность 271.2 kW подтвердила их справедливость. Выходное напряжение ППНП остается неизменным в широком диапазоне изменения суточной освещенности.

#### Литература

1. Kathy Kowalenko "Distributed Power Offers an Alternative to Electric Utilities", IEEE Institute, May, 2001, pp. 1,5.
2. <http://www.eren.doe.gov/distributedpower>
3. <http://grouper.ieee.org/groups/scc21/1547>.
4. Ильина Н.А., Жемеров Г. Г., Сабалаев А.Н. Пути энергосбережения в системах электроснабжения локальных промышленных объектов // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск "Силова електроніка та енергоефективність". Вип. 3, 2008. С. 43 – 46.
5. Жемеров Г.Г., Ильина Н.А., Тугай Д.В. Характеристики повышающего широтно-импульсного преобразователя постоянного напряжения в постоянное в системе распределенного электроснабжения // Электричество. 2004. - №12. - сс. 38-45.
6. Мейтин М. Фотовольтаика: материалы, технологии, перспективы // Электроника. 2002. - №6. – сс.25-33.
7. Ильина Н.А., Сабалаев А.Н. Построение аналитической зависимости, описывающей изменение естественной освещенности в течение суток на протяжении года. Світлолюкс. 2007.- №6.- сс 86-90.

### ЧОТИРИТАКТНИЙ ПІДВИЩУЮЧИЙ ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ В ПОСТІЙНУ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ІЗ СОНЯЧНОЮ БАТАРЕЄЮ

Н.О. Ільїна, Д.В. Тугай, А.Н. Сабалаєв

*Отримано математичну модель сонячного елемента, що дозволяє враховувати залежність його характеристик від рівня природної освітленості. Побудовано комп'ютерну Matlab-модель системи електропостачання локального об'єкту, що містить сонячну електростанцію, широтно-імпульсний підвищувач перетворювач постійної напруги в постійну і активне навантаження.*

### FOUR-CYCLE STEP-UP PULSE-DURATION CHANGER OF DIRECT VOLTAGE IN DIRECT VOLTAGE IN POWER-SUPPLY SYSTEM CONTAINING SOLAR BATTERY

N.A. Ilyina, D.V. Tugay, A.N. Sabalaev

*The mathematical model of solar cell, allowing for dependence of its characteristic curves upon natural illumination level has been obtained. Computer Matlab-model of electricity supply system of local object containing solar electric power station, pulse-duration step-up changer of direct voltage in direct voltage and resistive load has been made.*